

지구대기의 고마운 선물 '온실효과'

글 | 김경렬 _ 서울대학교 지구환경과학부 교수 krkim@snu.ac.kr

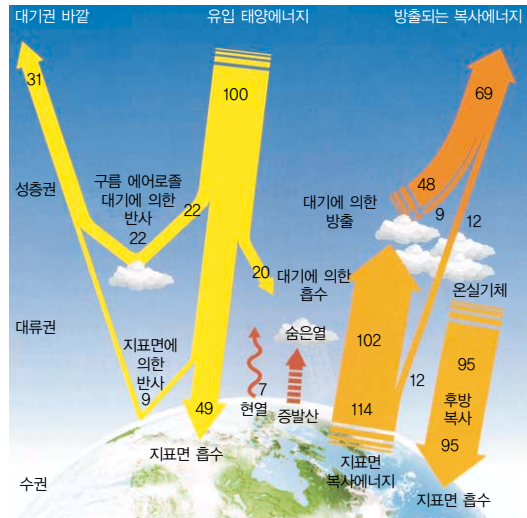
지난해 노벨평화상이 앨 고어와 최근의 기후변화문제를 연구하는 지구과학자들의 모임인 IPCC에 수여된 것은 '지구온난화'가 진지하게 걱정해야 할 중요한 문제임을 전지구인들에게 알리고 싶은 노벨상위원회의 마음을 잘 보여준다. 그런데 지구온난화에 관련되어 인구에 흔히 회자되는 단어로 '온실효과'가 있다. 온실효과는 물론 우리 행성 지구를 생명의 행성으로 만들어주는 필요불가결의 고마운 현상이다. 그런데 상이한 성격의 이 두 용어가 혼란스럽게 혼용되고 있는 것 같아 당황스럽다. 분명히 지구온난화를 걱정하는 내용일텐데 '온실효과를 어떻게 막을 수 있을까?'라는 제목으로 번역된 책이 널리 소개되고 있는 것은 이런 주변의 난처한 상황을 잘 보여준다.

지구온난화는 분명히 염려되는 중요한 지구환경의 문제이기에 '걱정스러운 지구온난화'라는 제목으로 뒤에 자세히 살펴볼 예정이며, 이번 글에서는 이에 앞서 생명의 행성 지구가 꼭 필요한 온화한 기후를 만들어내는 기본 요건들을 살펴보기로 하자.

지구기후의 기본 요건

46억 년 전 태양계가 탄생할 때 지구는 태양계 내의 한 식구로 태어났다. 그러나 친척인 금성, 화성과는 달리 지구는 액체상태의 물이 안정한 상태로 존재할 수 있는 따뜻한 생명의 행성으로 진화하였다. 이렇게 지구를 따뜻하게 만들어주는 가장 중요한 에너지원은 당연히 우리 별 태양에서 오는 복사에너지이다.

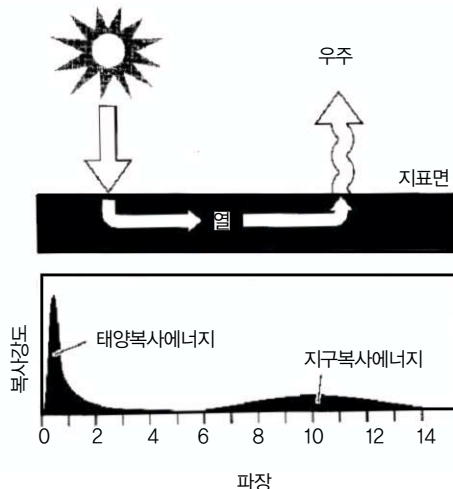
태양 전체가 내는 총복사에너지로 보면 멀리 떨어진 지구가 받는 양은 아주 적은 양이기는 하다. 그렇지만 이 태양 복사에너지를 받아 지구는 따뜻해지며, 이로 인해 따뜻해진 지구는 다시 자신의 복사에너지를 방출한다. 물론 태양과 지구 표면의 큰 온도차 때문에 태양 복사에너지는 가시광선 영역의 파장 0.5 μ m에서 최대값을 보여주며 지구가 방출하는 복사에너지는 10 μ m 정도의 적외선 영



대기의 존재로 인해 변화된 다양한 에너지 경로 및 우주, 대기 및 지표면이 에너지적으로 평형에 있음을 보여주는 모식도

역에서 최대값을 보여주어 파장별로 보면 큰 차이가 있다. 그렇지만 태양으로부터 지구로 유입되는 총태양복사에너지와 지구가 방출하는 총지구복사에너지 사이에는 열에너지의 평형이 이루어지면서 지구의 온도가 결정되며, 이런 열평형이 이루어져 있기에 지구의 평균 온도가 일정하게 유지되고 있는 것이다

그러나 이런 단순한 모형에는 문제가 있다. 지구가 단위 시간 동안에 단위표면적당 방출하는 적외선영역의 복사에너지는 지구를 흑체로 간주하여 흑체의 복사에너지를 기술하는 슈테판-볼츠만 법칙(절대온도 T의 흑체가 단위시간 동안 단위 면적당 방출하는 복사에너지 $W = \sigma T^4$, σ : 슈테판-볼츠만 상수 = $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)을 이용하여 계산할 수 있다. 여기에 구름이나 얼음과 같은 지표면에서 태양 복사에너지의 일부를 그대로 다시 우주공간으로 반사해 내보내는 반사도, 0.3을 이용하여 지구온도를 추정해보면 지구는 절대온도 255K(섭씨 -18 $^{\circ}$ C)의 공공 얼어붙은 행성이 될 수밖에 없다는 것이다!



태양 복사에너지와 지구 복사에너지의 평형으로 결정되는 지구기후시스템

온실효과로 절대온도 288도의 따뜻한 행성 유지

그러나 다행스럽게도 지구는 평균적으로 절대온도 288도(섭씨 15도)의 따뜻한 행성으로 유지되고 있다. 이는 바로 지구표면을 덮고 있는 수십 km 두께의 대기가 따뜻한 담요 역할을 하여 지구를 덥혀 주고 있기 때문이다. 이 사실을 처음으로 이해한 프랑스의 과학자 푸리에에는 1827년 이를 ‘온실효과’ 라고 명명하였다.

대기층이 지표면에 존재함으로 인해서 우주, 대기 및 지표면 사이에서 에너지를 주고받는 경로가 매우 복잡하게 된다. 그러나 복사경로를 나타낸 그림 역시 다름 아니라 우주, 대기, 그리고 지표면에서 에너지의 평형이 이루어지고 있음을 보여주는 그림에 불과하다. 그림의 숫자들은 태양으로부터 지구가 단위 면적, 단위 시간당 받는 복사에너지를 100으로 하였을 때의 상대적인 크기를 가리키는 것이며, 실제 100은 342 w/m^2 에 해당하는 복사에너지 양이다. 흥미 있는 독자는 우주, 대기, 지표면이 모두 에너지 수지가 아래와 같이 잘 균형을 이루고 있음을 살펴보기 바란다.

우주: 유입: 100(알베도 31 + 지구복사 69)

방출: 100

지표면: 유입: 144(태양복사 49 + 후방복사 95)

방출: 144(현열 7 + 증발산 23 + 지구복사 114)

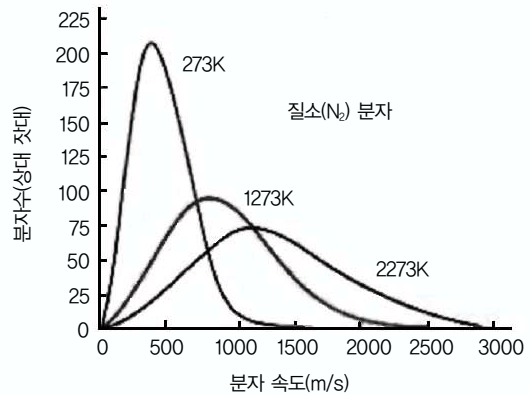
대기: 유입: 152(대기흡수 20+현열 7+증발산 23+지구복사 102)

방출: 152(우주방출 57 + 후방복사 95)

여기서 요점은 바로 이것이다. 지구는 태양의 복사에너지 49를 받아 더워진 후 114의 복사에너지를 방출하는데 실제 지구가 전체적으로 에너지 평형을 이루기 위하여 우주로 다시 내보내지 않으면 안 되는 복사에너지는 단지 69뿐이다. 따라서 나머지 45는 그대로 대기 중에 머물게 되며, 바로 이 45가 대기 중에 머물면서 지구를 덥히는 온실효과를 만들고 있는 것이다.

온실기체가 대기 중에 지구복사에너지 가둬

1850년대 말에 이르면 온실효과를 내는 대기성분이 대기를 주로 이루고 있는 질소나 산소가 아니라, 수증기, 탄산가스, 메탄, 오존, 산화이질소 등 좀 더 구조가 복잡한 분자들이며 영국의 틴달에 의해 밝혀지게 된다. 이들 분자들은 내부 운동 중에 쌍극자모멘트의 변화가 일어나며 지구가 방출하는 적외선 영역의 에너지를 흡수할 수 있다. 이렇게 지구복사에너지의 상당량을 대기 중에 가두어 지구를 따뜻하게 해주는 이들 기체들을 통틀어 ‘온실기체’ 라고 부르며, 바로 이들 덕분에 우리 지구는 생명이 있는 행성으로 유지될 수



세 부분의 온도(0°C, 100°C, 및 200°C)에서의 질소분자의 속도분포를 보여주는 맥스웰 분포도

있었던 것이다.

그런데 대기는 왜 지구 표면에 존재하는 것일까? 그 이유는 간단하다. 이들이 설명 지구를 떠나고 싶어도 그럴 수가 없기 때문이다. 지상의 물체가 지구의 중력을 극복하고 지구를 탈출하기 위해서는 탈출속도 11.2 km/sec 보다 더 빠른 속도를 가질 수 있어야 한다. 대기 기체들이 가지는 속도는 온도와 분자 질량에 따라 결정된다. 이미 1856년 맥스웰은 통계역학적 방법으로 주어진 온도에서 분자들이 가질 속도의 분포를 유도하였는데, 이를 보면 공기 분자들의 평균 속도가 적어도 초속 0.5 km 정도 되는 등 결코 느린 것은 아니다. 그렇지만 지구 탈출속도에 비하면 턱없이 부족하다. 현재 가벼운 기체인 헬륨이 지금도 적은 양이 지구를 탈출하고 있지만 이보다 더 무거운 기체들은 지구를 탈출하지 못하고 지구 대기를 만들고 있는 것이다. 지구의 ‘적절한’ 크기가 중요한 이유의 하나이다. 이런 대기 속에 사는 우리들은 필요한 산소를 공급받으며, 더욱이 온실효과를 통하여 만들어진 따뜻한 지구를 향유하고 있는 것이다.

‘적절한’ 대기가 만들어내는 ‘적절한’ 온실효과

그러나 온실효과가 지구에만 있는 것은 아니다. 이웃 금성은 온실효과가 너무 넘쳐 생명이 살 수 없는 뜨거운 행성이 되어 버렸고, 화성은 너무 적어 식어버린 행성이 되고 말았다. 우리 지구는 ‘적절한’ 대기를 가지고 있기에 ‘적절한’ 지구온난화를 만들며 생명의 행성으로 진화한 것이다. 최근 사람들이 이런 지구의 절묘한 조화를 스스로 깨뜨리는 것 같은 여러 징후가 나타나 염려가 된다. 유엔이 정한 지구의 해(IYPE)를 맞으면서 정말로 지구에 대하여 좀 더 고마운 마음을 가지며, 지구환경보호에 더욱 관심을 가져야 하지 않을까. ☺



글쓴이는 서울대학교 화학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를, 캘리포니아대학 샌디에이고 캠퍼스에서 해양학으로 박사학위를 받았다. 현재 지구환경과학부 학부장 겸 BK21사업단장으로 있으며, 해양연구소장을 겸임하고 있다.